Aus dem physiologischen Institut zu Straßburg i. E.

Über die Netzhautreizung durch kurzdauernde Lichtblitze und Lichtlücken

Inaugural-Dissertation

der medizinischen Fakultät
der Kaiser-Wilhelms-Universität Straßburg

zur Erlangung der Doktorwürde

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

vorgelegt von

David Rutenburg
aus Nevel (Rußland).

LEIPZIG.
Verlag von Johann Ambrosius Barth.
1914.

Sonderabdruck aus
„Zeitschrift für Sinnesphysiologie".
Bd. 48.
Verlag von Johann Ambrosius Barth in Leipzig.

Gedruckt mit Genehmigung der medizinischen Fakultät
der Universität Strafsburg.

23 JUL 1914

Referent: Prof. Dr. Gildemeister.
Korreferent: Prof. Dr. Ewald.

Während über die Netzhauterregung durch kurze Lichtblitze mehrere Arbeiten existieren, ist ein verwandtes Problem, die Erregung durch kurze Lichtlücken, erst in neuester Zeit bearbeitet worden. Gildemeister[1] hat darüber folgende Versuche mitgeteilt: Es wurden sehr kleine konstant erleuchtete Felder einäugig fixiert. Dann wurde ihre Beleuchtung eine kleine Zeit lang unterbrochen, und die Dauer der Pause so bemessen, dafs sie gerade wahrnehmbar war. Es wurden also die Schwellenreize bestimmt. Die Frage war, wie die Dauer der eben merklichen Pause sich ändert, wenn die konstante Beleuchtung variiert wird. Es ergab sich folgendes Gesetz: Je schwächer das Licht ist, desto gröfser mufs die Dauer sein.

In der vorliegenden Arbeit habe ich nun die gedachten Untersuchungen fortgesetzt. Ich habe untersucht, ob bei gegebener Intensität der Beleuchtung ein Lichtblitz oder eine Dunkelpause der wirksamere Reiz sei.

Der Plan der Untersuchung war folgender: Zuerst sollte ein sehr kleines Feld fixiert werden, das von einem Licht gewisser Intensität beleuchtet wurde. Durch geeignete Vorrichtungen war dann dieses Feld so lange zu verdunkeln, dafs die Beleuchtungspause gerade merklich wurde. Dann sollte in einem zweiten Versuch das Feld zunächst längere Zeit dunkel bleiben, und dann sollte es vorübergehend beleuchtet werden, wobei die Dauer des Blitzes wieder so zu bemessen war, dafs er zu einer eben überschwelligen Netzhauterregung Anlafs gab. Welche Beziehung besteht in diesem Falle zwischen den Längen der Pause und des Blitzes, und wie ändert sie sich mit der Intensität der Beleuchtung?

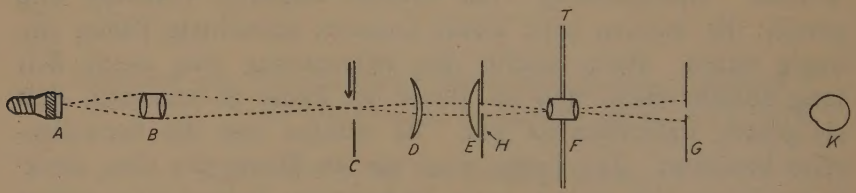
---

[1] M. Gildemeister, Über die Wahrnehmbarkeit von Lichtlücken. *Diese Zeitschr.* **48**, S. 256.

Methodik.

Ich bediente mich eines ähnlichen Apparates, wie ihn Gildemeister zu seinen Versuchen gebraucht hatte.

Der Leuchtstab A einer Nernstlampe wurde durch das Objektiv B auf einem Spalt C (von etwa 0,3 mm Breite) abgebildet. Vom Spalt gehen die Lichtstrahlen durch die Kondensorlinsen D und E einer optischen Bank, werden dadurch konvergent gemacht, und fallen schliefslich durch das Objektiv F, das in einem Loch der Tür T angebracht ist, auf den im Dunkelzimmer stehenden Schirm G. Dadurch entsteht auf diesem Schirm bei passender Einstellung der Linsen ein scharf begrenztes, ganz gleichmäfsig beleuchtetes helles Feld.[1]



Figur 1.

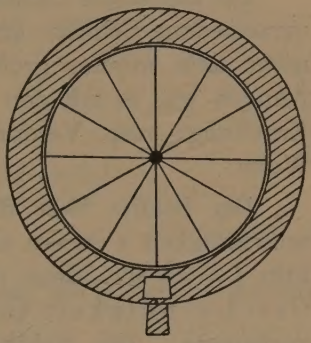
Der Schirm hatte in der Mitte ein kleines rundes Loch, das mit weifsem durchscheinendem Papier überklebt war. Der bei K, in 100 cm Entfernung vom Schirm sitzende Beobachter sieht also einen kleinen hellen Fleck, dessen Helligkeit durch Veränderung des Spaltes C und durch durchscheinende Gläser, die in den Strahlengang eingeschaltet sind, variiert werden kann.

Wenn das Feld erleuchtet ist, macht es keine Schwierigkeit, es dauernd zu fixieren. Anders aber ist es, wenn dasselbe dunkel ist und nur die momentane Erhellung beobachtet werden soll. In diesem Falle ist es bekanntlich nicht möglich, die richtige Blickrichtung innezuhalten. Ist das Auge aber im Momente der Erhellung abgeirrt, so treffen die Lichtstrahlen nicht mehr auf die Fovea, und es werden also bei den Lichtblitzen andere Netz-

[1] Zwischen D und E sind die Strahlen parallel; die Stelle der stärksten Einschnürung des Lichtbündels liegt im Objektiv F, und es wird B durch D auf der ebenen Fläche der Linse E, diese wieder durch F auf dem Schirm G abgebildet.

hautstellen gereizt als bei den Versuchen mit Lichtlücken. Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, wurden im Schirm rechts und links von dem zu beobachtenden Feld, in 1,3 cm Abstand von dessen Mitte, zwei kleine Glühlämpchen angebracht, die mit rotem Papier verkleidet und so abgeblendet wurden, dafs man an ihrer Stelle nur ganz kleine schwachleuchtende rote Punkte sah. Nun war es leicht, immer mitten zwischen diese Fixierzeichen zu blicken.[1]

Zwischen dem Spalt *C* und dem Objektiv *B*, möglich nahe an dem ersteren (an der Stelle des Pfeils auf Fig. 1), war ein Rad von etwa 70 cm Durchmesser (s. Fig. 2) angebracht, das an der Peripherie einen 7 cm breiten Blechkreis trug. Dieser schnitt das Licht vom Spalte ab. Nur an einer Stelle hatte er einen Schlitz. Dicht an diesem war ein Gewicht angebracht, so dafs die durchbrochene Stelle des Rades in der Ruhelage am tiefsten lag. Stiefs man das Rad jetzt an, so pendelte es hin und her, wobei der Schlitz an seiner Peripherie in gleichen Zeiträumen vor dem Spalt *C* vorbeiging und so das Licht einen Augenblick durch ihn hindurchliefs. Der Beobachter sah dann das kleine Feld rhythmisch für einen Moment aufblitzen.



Figur 2.

Die Breite des Schlitzes und damit die Dauer des Lichtblitzes konnte durch eingesetzte Blechstücke verändert werden.

Der breite Blechkranz trug unter dem Spalt noch eine Schraube, an der metallene Zungen verschiedener Breite befestigt werden konnten. Wurde das Rad jetzt um die Breite des Blechkranzes gehoben, so konnte das Licht ungehindert zum Spalte gelangen, mit Ausnahme der kurzen Zeit, wo die Zunge vor ihm

---

[1] Nagel und Schaefer sagen freilich (*diese Zeitschr.* 34, S. 279): „Es ist die Fixation der Mitte zwischen zwei im Dunkeln sichtbaren Punkten etwas so Unsicheres, dafs wir nicht darauf rechnen konnten, auf diese Weise das Abirren der Fixation bei Verwendung von Reizlichtern von erheblichem Dämmerungswert ... zu verhindern.“ Nach meinen Erfahrungen sind diese Schwierigkeiten durch Übung zu überwinden, zumal wenn, wie hier, auch die beiden Fixationszeichen noch auf die Fovea fallen (ihr Winkelabstand betrug 90′).

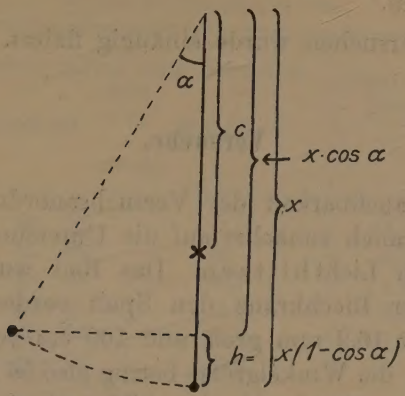
vorbeischwang. Der Beobachter sah das Feld jetzt also dauernd erhellt, und nur eine kurze Zeit lang wurde es verdunkelt. Durch Heben oder Senken des Rades konnte man es nach Bedarf für Blitze oder Lücken benutzen.

Die Konstanten dieser Vorrichtung waren: Schwingungsdauer 1,25 Sek. Abstand des Schlitzes vom Drehpunkt 36 cm,
„ der Zunge „ „ 44 „

Die Dauer des Lichtblitzes wurde dadurch variiert, dafs man verschiedene Schlitze einsetzte, und dafs man das Pendel einen mehr oder minder grofsen Schwingungsbogen beschreiben liefs. Ähnlich war es mit den Dunkelpausen. Der absolute Wert der Erhellungs- resp. Verdunkelungszeiten ergibt sich auf folgende Weise:

Der Schlitz habe die Breite a cm. Wenn er mit der Geschwindigkeit v cm/sec. am Spalte vorbeigeht, so dauert der Lichtblitz $t = a/v$ sec. (denn $v = a/t$). Es kommt also darauf an, die Geschwindigkeit zu finden, mit der der Schlitz am Spalt vorbeigeht. Der Schlitz sitzt hier an einem physischen Pendel von der Schwingungsdauer b (in unserem Falle 1,25 Sek.). Dieses entspricht einem mathematischen Pendel von der Länge x cm. Da in Strafsburg das Sekundenpendel eine Länge von 99,4 cm hat, und sich die Längen zweier Pendel wie die Quadrate der Schwingungszeiten verhalten, ergibt sich die Gleichung $x: 99{,}4 = b^2 : 1^2$; also $x = 99{,}4\, b^2$. So weit von der Drehachse liegt also der Schwingungspunkt dieses physischen Pendels. Wenn das Pendel um den Winkel α von der Ruhelage abgelenkt wird, so wird sein Schwingungspunkt damit um die Höhe $h = x\ (1 - \cos\alpha) = 2\, x \sin^2 \frac{\alpha}{2}$ (s. die Fig. 3) gehoben; er passiert also die Gleichgewichtslage mit der Geschwindigkeit $V = \sqrt{2\, gh} = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sqrt{g\, x}$. Es soll aber die entsprechende Geschwindigkeit v desjenigen Punktes gefunden werden, der nicht x, sondern c cm Abstand von der Drehachse hat. Man hat nun $v : V = c : x$, oder $v = \frac{Vc}{x}$. Setzt man hier den eben gefundenen Wert von V ein, so ergibt sich $v = 2\, c \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{g}{x}}$, oder, da

$$x = 99{,}4\, b^2, \text{ so ist } v = \frac{2c \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{g}}{b\sqrt{99{,}4}}$$



Figur 3.

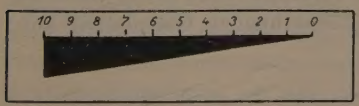
Da der Lichtblitz, wie oben gefunden, die Dauer $t = a/v$ hat, so heifst das Endresultat

$$t = \frac{a \cdot b \cdot \sqrt{99{,}4}}{2c\sqrt{g} \sin \frac{\alpha}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 1)$$

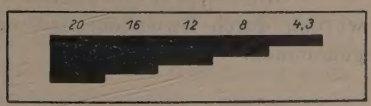
Der besseren Übersicht wegen stelle ich nochmals die Bedeutung der hier vorkommenden Buchstaben zusammen:

a Breite des Schlitzes resp. der Zunge,
b Schwingungsdauer des physischen Pendels,
c Abstand des Schlitzes resp. der Zunge von der Drehungsachse,
g Konstante der Erdbeschleunigung,
α Ausschlagswinkel.

Auf die beschriebene Weise wurde die Dauer des optischen Reizes variiert. Zur bequemen Ablesung des Ausschlagwinkels trug der Blechkranz eine Gradeinteilung. Die Intensität der Beleuchtung des Feldes wurde wie in den Gildemeisterschen Versuchen durch eine vor den Spalt gesetzte Blende von der Form der Fig. 4b abgestuft. Je nach der Stellung derselben blieb der



a



b

Figur 4.

Spalt in der Länge von 2,15, 4, 6, 8 oder 10 mm unbedeckt und für das Licht durchgängig; in demselben Maſse veränderte sich also auch die Menge des auf das beobachtende Feld gelangenden Lichtes.[1]

Bei allen Versuchen wurde einäugig fixiert.

Versuche.

Um die Brauchbarkeit der Versuchsanordnung zu prüfen, beschränkte ich mich zunächst auf die Untersuchung der Wahrnehmbarkeit von Lichtblitzen. Das Rad wurde also so tief gestellt, daſs der Blechkranz den Spalt verdeckte. Das beobachtete Feld war 16,2 mm groſs und 100 cm von der Versuchsperson entfernt; die Winkelgröſse betrug also 56 Minuten. Unter diesen Umständen fällt das Netzhautbild noch ganz auf die Fovea. Da diese schon nach wenigen Minuten ihre volle Dunkeladaptation erreicht hat, begann der Versuch immer 10—15 Minuten, nachdem die Vp. den Dunkelraum betreten hatte. Es wurde eine bestimmte Helligkeit eingestellt, und das Pendel dann von einem ziemlich groſsen Winkel (beispielsweise 90°) fallen gelassen. Gewöhnlich konnte die Vp. bei diesem groſsen Schwingungsbogen den Blitz noch nicht wahrnehmen. Wenn das Pendel aber dann ausschwang und der beschriebene Bogen immer kleiner wurde, erlangte schlieſslich der Blitz die zur Schwellenreizung nötige Länge. Die Vp. gab dann ein Zeichen und der Versuch wurde unterbrochen. Nach einer Pause von 1—2 Minuten wurde derselbe Versuch noch ein- oder zweimal wiederholt. Dann, nach derselben Pause, wurde eine andere Lichtstärke eingestellt usw. Die Gradbogen, bei denen die Blitze eben merklich waren, wurden samt den zugehörigen Lichtstärken vom Versuchsleiter protokolliert.

Als Beispiel eines solchen Versuches sei der folgende hier angeführt.

---

[1] Gröbere, aber nicht genauer gemessene Veränderungen der Lichtstärke wurden durch Zwischenschaltung von durchscheinenden Glasplatten vorgenommen.

Tabelle 1.

Nr. 5. Vp. M. M. Feldgröfse 56'. Schwingungsdauer 1,25". Breite der Zunge 0,5 cm.

Rel. Lichtstärke	Pendelelongation beim Schwellenwert (Grade) abgelesen			Mittelwert	Dauer des Blitzes σ	Lichtmenge (Lichtstärke × Dauer)
20	92	90	92	91,3	3,09	62
16	80	84	82	82	3,37	54
12	60	62	60	60,7	4,38	54
8	42	38	40	40	6,46	52
4,3	20	22	23	21,7	11,74	50
20	88	90	90	89,3	3,14	63

Strenggenommen handelt es sich hier nicht um Einzelreize, sondern um rhythmische in einem Intervall von 1,25 Sekunden. Aber es lag kein Grund vor, zu vermuten, dafs diese beiden Reizarten verschiedene Ergebnisse liefern sollten. Von einer „Addition latente", einer Summation unterschwelliger Reize, ist in der Optik meines Wissens nichts bekannt. Deshalb trug ich kein Bedenken, hier diesen viel weniger ermüdenden Reizmodus anzuwenden. Wäre das Pendel nach jedem Vorbeigehen am Spalte angehalten worden, so hätte die Vp. dem Versuchsleiter jedesmal mitteilen müssen, ob sie den Blitz wahrgenommen habe oder nicht. Vor jedem neuen Einzelreiz wäre dann ein Signal nötig gewesen usw. Aus diesen Gründen haben auch frühere Untersucher bei Untersuchungen über Lichtblitze zum Teil die rhythmische Reizung benutzt.[1]

---

[1] Beispielsweise Dr. Eyster (*diese Zeitschr.* **41**, S. 373) und Boswell (*diese Zeitschr.* **42**, S. 299) unter Leitung von v. Kries. In der ersteren Arbeit findet sich darüber (S. 379) folgende Bemerkung: „Was die Normieruug der zeitlichen Verhältnisse anbetrifft, so erschien es, abgesehen von der technischen Bequemlichkeit auch aus Gründen der Beobachtung selbst unbedingt wünschenswert, periodisch wiederholte Reize zu benutzen. Denn gerade die regelmäfsige Wiederholung in einem bekannten Intervall bietet ein aufserordentlich wertvolles Hilfsmittel für die Gewinnung eines sicheren Kriteriums, ob ein Licht sichtbar ist oder nicht. Andererseits kann bei den hier benutzten Lichtstärken, bei denen die primären Reiz-

Die Versuche ergaben nun folgende Resultate:

Tabelle 2.

Rel. Lichtstärken		20	16	12	8	4,3
Vers. 1 M. G.	Dauer des Blitzes in σ	3,51	3,73	3,76	5,17	11,59
	Lichtmenge	70	60	45	41	50
Vers. 2 L. J.	Dauer des Blitzes in σ	3,28	3,57	3,99	7,43	12,92
	Lichtmenge	66	57	48	59	56
Vers. 3 S. Sch.	Dauer des Blitzes in σ	3,22	3,47	4,21	6,58	13,20
	Lichtmenge	64	56	51	53	57
Vers. 4 D. Z.	Dauer des Blitzes in σ	3,28	3,89	4,36	5,17	6,58
	Lichtmenge	66	62	52	41	28
Vers. 5 M. M.	Dauer des Blitzes in σ	3,12	3,37	4,38	6,46	11,74
	Lichtmenge	62	54	53	52	51
Vers. 6 M. G.	Dauer des Blitzes in σ		2,97	3,44	4,71	6,63
	Lichtmenge		48	41	38	29

Man sieht, dafs der eben wahrnehmbare Blitz desto kürzer ist, je stärker das Licht. Das stimmt mit den Befunden aller früheren Untersucher[1] überein. Das zur Minimalreizung nötige Lichtquantum (Intensität $\times$ Dauer) wird aber hier mit abnehmender Lichtstärke deutlich kleiner. In der Literatur findet sich im Gegensatz dazu die Angabe, dafs es bei kurzen Blitzen (bis hinauf zu 0,125 Sek. Dauer) konstant ist und erst bei sehr langen Blitzen mit abnehmender Lichtstärke wächst.[2] Hier liegt also ein Widerspruch zwischen meinen Befunden und denen der übrigen Autoren vor.

---

erfolge an der Grenze der Sichtbarkeit stehen, von einer Störung durch die ihrem Betrage nach weit zurückbleibenden sekundären und tertiären Bilder wohl kaum die Rede sein, wenn die Periode der Wiederholung gröfser als eine Sekunde ist."

[1] A. M. Bloch, Compt. rend. de la soc. de biologie 2, S. 493. 1885. A. Charpentier, *Arch. d'ophthalm.* **10**, S. 110, 1890. J. v. Kries, *diese Zeitschr.* **41**, S. 373. 1907. O. Weiss und E. Laqueur, *Beitr. z. Physiologie u. Pathologie* (Festschr. f. L. Hermann), S. 189. 1908.

[2] J. v. Kries, a. a. O. A. Blondel und J. Rey, *J. de physique* (5) I, S. 530. 1911.

Es waren nun zwei Möglichkeiten denkbar. Entweder verhielten sich meine Vpn. anders als diejenigen der früheren Untersucher; das war sehr wenig wahrscheinlich. Oder in meinen Versuchen steckten irgendwelche Fehler, so dafs die Berechnung der Lichtquanten falsch war.

Die Dauer der Lichtblitze war jedesmal aus der Ablenkung des Pendels berechnet worden. Um die Richtigkeit der Berechnung zn kontrollieren, wurde am Pendel ein berufstes Blatt Papier befestigt, das von einer schwingenden Stimmgabel (von 100 Schwingungen pro Sek.) berührt wurde. Darauf nun wurde das Pendel aus verschiedenen Höhen fallen gelassen und die Sinuslinien ausgemessen. Die so ermittelten Geschwindigkeiten stimmten mit den berechneten in sehr befriedigender Weise überein. Der Fehler konnte also nur in der Ermittelung der Lichtintensität liegen.

Diese wurde, wie oben erwähnt, in folgender Weise variiert: Ein vom Bilde eines Nernststiftes bedeckter Spalt wurde durch vorgeschobene Blenden verkürzt, und es wurde angenommen, dafs die Lichtstärke proportional der Länge des frei gelassenen Stückes sei. Wenn der Spalt nun nicht überall gleich breit war, so war diese Annahme natürlich unzulässig. Ich überzeugte mich aber durch mikroskopische Messung von der Grundlosigkeit meines Verdachtes.

Ebenso mufsten Fehler entstehen, wenn das Bild des Nernstfadens (das übrigens nur in seinem mittleren Teile ausgenutzt wurde) ungleichmäfsig hell war. Ich verschob deshalb das Bild auf dem Spalte in verschiedenen Richtungen, aber immer wichen meine Resultate von den zu erwartenden in demselben Sinne ab. An kleinen Zufälligkeiten in der Verteilung der Lichtemission konnte das also nicht liegen.

Nun wurde durch Photometrie untersucht, ob sich die bei verschiedenen Spaltlängen durchgehenden Lichtmengen wirklich wie 2,15 : 4 : 6 : 8 : 10 verhielten. Ich bediente mich nach dem Vorgange von Weiss und Laqueur (l. c.) folgenden einfachen Verfahrens: Zwei gleichschenklig-rechtwinklige Glasprismen wurden in der Mitte der Hypothenusenflächen mit einem Tropfen Kanadabalsam versehen und mit diesen so zusammengelegt, dafs sie einen Würfel bildeten. Sah man jetzt senkrecht auf eine Kathetenfläche, so spiegelte die Hypothenusenfläche vollkommen alle seitlich liegenden Gegenstände, nur wo der Kanadabalsam die

beiden Prismen zusammenkittete, sah man die hinter dem Würfel liegenden Gegenstände wie durch ein Loch in einem schrägen Spiegel. Dieses Photometer wurde so gestellt, dafs ich durch das Loch die von dem zu untersuchenden Licht beleuchtete Fläche, in der spiegelnden Hypothenusenfläche aber eine durch ein elektrisches Lämpchen erleuchtete Milchglasscheibe sah, deren Helligkeit ich durch Verschieben des Lämpchen in mefsbarer Weise abstufen konnte. Es wurde nun in bekannter Weise auf scheinbares Verschwinden des Loches eingestellt. Die Abweichungen, die ich von den theoretischen Werten 2,15 : 4 : 6 : 8 : 10 fand, waren klein und lagen innerhalb der Versuchsfehler. Jedenfalls konnte sie die beobachtete Inkonstanz des minimalen Lichtquantums nicht erklären.

Schliefslich war Herr Prof. Gildemeister so freundlich, die selbe Frage auf photographischem Wege zu untersuchen. Er belichtete 5 Felder einer Platte mit den zu untersuchenden Lichtern derartig, dafs die Expositionszeiten sich wie 1 20 : 1/16 : 1 12 : 1 8 : 1 4,3 verhielten; natürlich entsprach dem stärksten Licht die kürzeste Expositionszeit. Wenn die Lichtstärken selbst in dem Verhältnis 20 : 16 : 12 : 8 : 4,3 standen, so mufsten die Schwärzungen gleich sein. Das war auch merklich der Fall.

Alle diese Versuche sprachen dafür, dafs meine Methode zur Abschwächung des Lichtes einwandfrei war, und dafs die Inkonstanz des Lichtquantums anderen Ursachen zuzuschreiben war. Um diesen Schlufs noch mehr zu sichern, benutzte ich schliefslich zur Variierung der Lichtstärke eine ganz zweifellose Vorrichtung, nämlich zwei Nicolsche Prismen. Das eine wurde unmittelbar vor das beobachtete Feld gesetzt, das andere, das um leicht ablesbare Winkel gedreht werden konnte, unmittelbar vor das Auge der Vp. Bei gekreuzten Nicols stand der Zeiger auf dem Nullpunkt des Gradbogens.

Nun wurden folgende Winkel zwischen den Polarisationsebenen eingestellt: 26° 34′, 39° 14′, 50° 46′, 63° 26′, 90°.

Die Vp. gab jedesmal, wie oben beschrieben, an, bei welcher Pendelelongation sie den Blitz eben wahrnahm. Da die Sinusquadrate obiger Winkel sich wie 1 : 2 : 3 : 4 : 5 verhalten, stehen nach einem bekannten Gesetz auch die Lichtintensitäten in denselben Verhältnissen.

Die mehrfach an verschiedenen Versuchspersonen angestellten

Experimente ergaben wieder dasselbe Resultat: die Lichtquantitäten waren bei hohen Intensitäten gröfser als bei geringen.

Das konnte nun nur noch an physiologischen Umständen liegen.

Als wir unsere Versuchsbedingungen sorgfältig analysierten, kam uns schliefslich der Gedanke, ob nicht die Veränderung des Reizrhythmus beim Übergang von einer Lichtintensität zur anderen zur Erklärung unserer Beobachtungen heranzuziehen sei. Denn bei grofser Lichtstärke macht unser Verdunkelungspendel auch grofse Ausschläge, und für diese gilt bekanntlich der Satz von der Konstanz der Pendelschwingungsdauer nicht mehr, letztere wächst vielmehr. Deshalb werden bei geringer Beleuchtung des Feldes und kleinen Schwingungsweiten die einzelnen Blitze rascher aufeinander folgen; gibt es also auf optischem Gebiete eine Summation unterschwelliger Reize, so werden solche Reize, die wegen zu kurzer Dauer bei einzelner Darbietung noch unmerklich wären, nun überschwellig werden; man findet also für sie eine zu kurze Dauer und deshalb auch ein zu kleines Lichtquantum. Durch die Annahme einer Summationswirkung wären mithin meine Beobachtungen befriedigend zu erklären.

Nun ist die Frage, ob der Unterschied zwischen den Schwingungsdauern bei kleinen und grofsen Elongationen beträchtlich genug ist, um physiologisch eine Rolle zu spielen. Nennt man die Schwingungsdauer bei sehr kleinen Ausschlägen T_o, so ist die Schwingungsdauer T bei Ausschlägen von der Winkelgröfse β

$$T = T_o\left(1 + \frac{1\cdot1}{2\cdot2}\sin^2\beta/_2 + \frac{1\cdot1\cdot3\cdot3}{2\cdot2\cdot4\cdot4}\sin^4\beta/_2 + \frac{1\cdot1\cdot3\cdot3\cdot5\cdot5}{2\cdot2\cdot4\cdot4\cdot6\cdot6}\sin^6\beta/_2 + \ldots\right)$$

Die Klammer auf der rechten Seite hat die Werte

Schwingungswinkel	10	20	30	40	50	60	70	80	90 Grad
Klammerwert	1,002	1,01	1,02	1,03	1,05	1,07	1,10	1,14	1,18

Bei Elongationen von 30° und mehr nimmt die Schwingungsdauer also schon sehr wesentlich zu, und solche wurden bei gröfseren Intensitäten immer erreicht oder gar erheblich überschritten.

Ich habe dann einige physiologische Versuche über diese Frage angestellt. Dem Pendel wurden durch Zusatzgewichte verschiedene Schwingungszahlen gegeben, und dann wurde, bei

gleichbleibender Lichtstärke unter Benutzung der Formel 1 S. 272 die Dauer des Schwellenblitzes bestimmt (s. die Tabelle 3). Tatsächlich ist diese desto kleiner, je frequenter die Schwingungen.

Tabelle 3.

Schwingungsdauer des Pendels	Dauer des Minimalblitzes in σ
M. G. 1,67"	8,1
M. G. 1,28"	6,6
M. G. 1,00"	6,2
M. M. 1,94"	13,2
M. M. 1,28"	10,2
M. M. 1,00"	10,5
D. R. 1,94"	9,6
D. R. 1,28"	7,0
D. R. 1,00"	6,7

Damit ist bewiesen, dafs es auch für die Netzhaut eine Summation unterschwelliger Reize gibt, die sich noch bei Intervallen von 1,3 Sekunden geltend macht.

Wenn diese nun die Inkonstanz des Lichtquantums veranlafst, so mufs letzteres konstant werden, wenn die Reizintervalle immer die gleiche Länge besitzen.

Ich versah jetzt 5 Blechstücke mit Schlitzen, deren Breiten sich annähernd wie 1/4,3 : 1/8 : 1/12 : 1/16 : 1/20 verhielten (die wirklichen Breiten waren 17,9, 9,4, 6,0, 4,75, 3,7 mm). Nun wurden Versuche von der gewöhnlichen Art gemacht, in denen bei der Lichtstärke 4,3 der Schlitz 1/4,3, bei der Lichtstärke 8 der Schlitz 1/8 zur Anwendung kam usw., und wieder jedesmal festgestellt wurde, bei welcher Pendelelongation der Blitz eben wahrnehmbar war. Da nun das Lichtquantum proportional dem Produkte von Lichtstärke und Schlitzbreite, und umgekehrt proportional dem Sinus des halben Ausschlagwinkels ist (s. Formel 1, S. 272), da aber jetzt das besagte Produkt unverändert bleibt, so mufs auch der Ausschlagwinkel in jeder Versuchsreihe derselbe bleiben, wenn das zur Minimalreizung nötige Lichtquantum selbst konstant ist. Bei gleichem Ausschlagwinkel sind dann aber auch die Reizintervalle gleich.

Es war also nur zu prüfen, ob jedesmal der Blitz bei derselben Pendelelongation bemerkt wurde. War das der Fall, so

war erstens festgestellt, dafs auch unter meinen Versuchsbedingungen der Satz von der Konstanz des Lichtquantums gilt, und dafs meine früheren abweichenden Befunde durch Summation zu erklären sind.

Von meinen Versuchen, die alle dasselbe Ergebnis lieferten, will ich nur zwei anführen (s. die Tabelle 4).

Tabelle 4.

Lichtstärke		Schlitzbreite mm	Pendelelongation abgelesen		Pendelelongation Mittel	Dauer des Blitzes σ	Lichtmenge
M.G.	4,3	17,9	40	40	40	28,92	124
	12	6,0	42	42	42	9,27	111
	20	3,7	36	42	39	6,12	122
R. S.	4,3	17,9	52	52	52	22,08	95
	8	9,4	50	53	51,5	12,18	97
	12	6,0	50	52	51	7,72	111
	16	4,75	50	50	50	6,20	99
	26	3,7	52	50	51	5,15	103

Bei jedem von ihnen blieb der Pendelausschlag und die Lichtmenge innerhalb der unvermeidlichen Versuchsfehler konstant.

Um nun in meinen ferneren Versuchen über die Frage, ob bei gleicher Lichtintensität ein Blitz oder eine Pause wirksamer sei, die Summation gänzlich auszuschliefsen, verwendete ich von jetzt an, da ich auf die Vorteile der rhythmischen Reizung nicht verzichten wollte, sehr grofse und immer gleiche Reizintervalle. Ich balanzierte das Rad, welches mir bisher, einseitig beschwert, als Pendel gedient hat, sorgfältig aus und drehte es durch einen Motor. Jede Umdrehung dauerte 3,75 Sekunden. Blitze, die in diesen Intervallen aufeinander folgten, waren nicht wirksamer als einzelne.

Wie eingangs beschrieben, konnten durch dasselbe Rad durch einfache Verstellung der Achse Blitze oder Pausen hergestellt werden. Die zeitliche Dauer dieser Reize wurde durch Einsetzung verschiedener Spalte und Zungen variiert, die Lichtstärke anfangs durch Verschieben einer Dreiecksblende vor dem Spalt, später durch zwei Nicols.

Die Versuche verliefen auf folgende Weise: Nachdem die Vp. etwa 10 Minuten im Dunkeln verweilt hatte, wurde das Rad so gestellt, dafs das Licht für gewöhnlich durch den Blechkranz

abgefangen wurde (Blitzeinstellung). In die ausgesparte Öffnung wurde ein Schlitz gewisser Breite eingesetzt und der Motor in Gang gebracht. Dann wurde die dreieckige Blende (Fig. 2b) so lange verschoben, bis der Blitz für die Vp. eben überschwellig war, worüber diese durch Zuruf Auskunft gab. Die dann erreichte Blendenbreite wurde notiert und als Mafs der Lichtstärke genommen. Dasselbe Verfahren wurde mit anderen Schlitzen wiederholt. Dann wurde das Rad gehoben, so dafs das Licht frei unter ihm hindurch passieren konnte, mit Ausnahme der kurzen Zeit, wo es durch die Metallzunge abgefangen wurde (Pauseneinstellung). Ermittelung der Schwellenintensität wie eben beschrieben.

Tabelle 5.

Dauer des Blitzes oder der Pause σ	Winkel der Nicols (Mittelwert) Grade: Blitz	Pause	Lichtstärke [1]: Blitz	Pause	Lichtmengen: Blitz	Mittel	Pause
1. M. G. 6,14	32	47	28,1	53,5	173	157	329
9,96	23	25	15,3	17,9	153		178
29,70	12,75	13,50	4,9	5,9	146		174
2. D. R. 6,14	18,25	37,05	9,8	36,3	60	73	223
9,96	16,75	26,25	8,3	19,5	83		194
29,70	7,25	11,50	2,5	4,0	75		118
3. A. S. 6,14	21	33,25	12,8	30,1	79	76	185
9,96	15,75	17,50	7,4	9,0	73		90
4. M. G. 6,14	14,25	18	6,1	9,6	37	39	59
9,96	12,25	11	4,5	3,6	45		36
29,70	6,10	6,26	1,1	1,1	34		33
5. D. Z. 6,14	38,50	70	38,7	88,3	237	254	543
9,96	31,50	30,50	27,3	25,8	272		257
29,70	17	16,75	8,6	8,3	254		247
6. D. R. 6,14	17,15	41,75	8,7	44,3	53	53	272
9,96	13,50	18,65	5,5	10,2	54		102
29,70	7,55	6,10 (?)	1,7	1,1 (?)	52		34 (?)

Diese Versuche zeigten schon deutlich, dafs die Pausen im allgemeinen länger sein müssen als die Blitze. Die Versuchstechnik war aber noch recht unvollkommen, weil die Verständigung

[1] Die gröfstmögliche Lichtstärke 90° gleich 100 gesetzt.

zwischen Vp. und Leiter manche Schwierigkeiten hatte und deshalb die Einstellung der Schwellenintensität zeitraubend war und beide Teile vorzeitig stark ermüdete.

Ich ging deshalb zur Verwendung Nicolscher Prismen über. Das eine war wieder dicht vor dem beobachteten Felde, das andere dicht vor dem Auge der Vp. angebracht. Um Pupillenveränderungen unschädlich zu machen, befand sich zwischen dem Auge und dem zweiten Nicol noch ein Diaphragma von 4 mm Durchmesser.

Die Einstellung der Blitz- und Pausendauer erfolgte nun wie vorher; die Intensität aber regulierte die Vp. selbst, indem sie den zweiten Nicol drehte. War der Schwellenwert gefunden, was erst nach einiger Übung sicher gelang, so wurde, gewöhnlich von einer Hilfsperson, der Winkel zwischen den Polarisationsebenen abgelesen.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 dargestellt.

Daraus ist folgendes zu entnehmen:

1. Die Lichtquantitäten sind bei Minimal*blitzen* (vorletzter Stab) in den Grenzen von 6 bis 30 σ konstant. Das entspricht den Befunden des vorigen Abschnittes und den Angaben der früheren Autoren.

2. Die Lichtquantitäten bei Minimal*pausen* (letzter Stab) wachsen zwischen denselben Grenzen mit der Lichtstärke. Zu denselben Resultaten ist M. Gildemeister in der oben zitierten Arbeit gekommen.

3. Bei gleicher Dauer erfordert, wenn das beleuchtete Feld sehr hell ist (d. h. so hell, dafs der Minimalblitz etwa 6 σ lang ist), die Pause eine 2—5 mal so grofse Lichtintensität als der Blitz. Bei schwächerer Beleuchtung gleicht sich der Unterschied mehr und mehr aus, und schliefslich erfordern Pause und Blitz etwa dieselbe Intensität.

Der letzte Satz wird noch anschaulicher, wenn man ihn in etwas anderer Weise ausspricht. Wir haben oben die Frage aufgeworfen, ob bei *gleichen Intensitäten* der eben wahrnehmbare Blitz oder die Pause länger dauern müsse. Diese Frage findet durch die zuletzt mitgeteilten Versuche noch keine unmittelbare Antwort, da ja aus technischen Gründen nicht die Intensität, sondern die Dauer in jeder Versuchsreihe konstant gehalten ist. Sie ist aber mit Berücksichtigung der früheren Befunde nicht schwer zu beantworten.

Da das Produkt von Intensität und Dauer bei Lichtblitzen in dem hier in Betracht kommenden Bereich konstant ist, da dieses ferner jedesmal durch die Blitzversuche ermittelt wird, läfst sich für jede beliebige Lichtstärke auch die Dauer des Lichtblitzes angeben. Man weifs also, wie lang die Blitze gewesen wären, wenn ihre Intensität ebenso grofs gewesen wäre wie bei den Pausenversuchen. Von diesem Gesichtspunkt aus ist die Tabelle 6 berechnet worden.

Tabelle 6.

b, *c* und *d* sind der Tabelle 5 entnommen; *e* ist durch Division von *d* durch *c* errechnet.

a	b	c	d	e
Versuch	Pause		Blitz	
	Dauer in σ	Lichtstärke	Lichtmenge	Dauer in σ bei Lichtstärke *c*
1	6,14	53,5	157	2,94
	9,96	17,9	157	9,37
	29,70	5,9	157	26,90
2	6,14	36,3	73	2,01
	9,96	19,5	73	3,72
	29,70	4,0	73	8,30
3	6,14	30,1	76	2,52
	9,96	9,0	76	8,41
4	6,14	9,6	39	4,03
	9,96	3,6	39	10,57
	29,70	1,1	39	34,70
5	6,14	88,3	254	3,26
	9,96	25,8	254	9,86
	29,70	8,3	254	30,60
6	6,14	44,3	53	1,20
	9,96	10,2	53	5,19
	29,70	1,1 (?)	53	46,90 (?)

Daraus ist zu entnehmen, dafs bei grofser Intensität (s. Stab c) die Pause beträchtlich länger sein mufs als der Blitz ($b > e$), dafs die Längen beider optischen Reize aber bei geringer Inten-

sität etwa gleich werden ($b = e$). Ob bei noch schwächer beleuchteten Feldern nicht die Minimalpausen sogar noch kürzer werden als die Blitze, habe ich mit meinen Hilfsmitteln nicht untersuchen können. Es spricht aber vieles für diese Vermutung.

Zusammenfassung.

In dieser Arbeit ist untersucht worden, ob bei gegebener Lichtintensität, wenn es sich um Schwellenreize handelt, ein Lichtblitz oder eine Dunkelpause der wirksamere Reiz sei. Die dargebotenen Felder waren klein, so dafs nur die Fovea gereizt wurde; sie waren leicht gelblich gefärbt und wurden einäugig fixiert.

Dabei hat sich ergeben, dafs bei grofser Intensität die Pause beträchtlich länger sein mufs als der Blitz, dafs die Längen beider optischen Reize aber bei geringer Intensität etwa gleich werden.

Lichtblitze, die wegen zu geringer Intensität und Dauer noch unter der Schwelle liegen, werden überschwellig, wenn sie mit einem zeitlichen Intervall von 1,5 Sekunden oder weniger wiederholt werden. Es gibt also auch auf optischem Gebiete eine „Addition latente".

Auch meine Versuche haben gezeigt, dafs bei sehr kurzen Minimalblitzen die eben wahrnehmbare Lichtmenge konstant ist. Bei Minimalpausen dagegen ist die Lichtmenge, die herausgeschnitten werden mufs, damit die Lücke eben wahrgenommen wird, nicht konstant; sie wächst vielmehr, wie es schon Gildemeister angegeben hat, mit der Lichtstärke des Dauerlichts.

Zum Schlusse ist es mir eine angenehme Pflicht, Herrn Prof. Gildemeister für die Anregung zu dieser Arbeit und für die freundliche Unterstützung bei ihrer Ausführung meinen besten Dank auszusprechen.

Lebenslauf.

Verfasser wurde am 14. Dezember 1889 zu Nevel (Rufsland) als Sohn des Kaufmanns Michael Rutenburg geboren.

Im August 1902 trat er in die Oberrealschule zu Kronstadt ein, von welcher er das Absolvierungszeugnis im Juni 1908 erhielt.

Dann widmete er sich dem Studium der Medizin. Während seiner Studienzeit besuchte er in Strafsburg die Vorlesungen, Kliniken und Kurse folgender Herren Professoren:

Blum, Chiari, Ehret, Ewald, Fehling, Gildemeister, Hertel, Hofmeister, Madelung, Manasse, Meyer, Multzer, Schwalbe, Spiro, Salge, Schmiedeberg, v. Tabora, Uhlenhuth, Weidenreich, Wenckebach, Wolff, Wollenberg.

Allen diesen Herren, seinen hochverehrten Lehrern, spricht Verfasser seinen ergebensten Dank aus.